

氏 名	結 城 雅 晶
学位（専攻分野の名称）	博 士（林学）
学 位 記 番 号	甲 第 767 号
学位授与の日付	平成 31 年 3 月 20 日
学 位 論 文 題 目	中央加振法の木材への適用可能性
論 文 審 査 委 員	主査 教 授・博士（林学） 大 林 宏 也 教 授・博士（農学） 今 富 裕 樹 教 授・博士（林学） 江 口 文 陽 教 授・博士（生物環境調節学） 田 島 淳 博士（農学） 久保島 吉 貴*

## 論文内容の要旨

### 第 1 章

木材の振動的性質の評価は、構造用木材の強度の非破壊的な指標、楽器などを製作する際の材料の特性、建物の遮音・防音性能など生活に関する指標、地震や振動に対する制振性能などを把握するために重要である。このうち、木材の物性値の測定や楽器用材の評価ではたわみ振動試験が多く用いられている。この方法は細長いはり状の試験片を振動させて測定する方法である。楽器用材の評価では、時間軸的特性として材料の加振に対する応答の速さを表す比動的ヤング率 ( $E'/\gamma$ )、音が長く持続するかの指標である損失正接 ( $\tan\delta$ ) を測定している。一般的に  $E'/\gamma$  が大きく、 $\tan\delta$  が小さい材料が楽器用材として優れているとされている。これ以外に、周波数軸的特性として、音色との相関が高い動的せん断弾性係数 ( $G'$ ) を測定し評価している。たわみ振動試験は、試験片の支持方法によって複数の試験方法があり、支持方法によって試験片の共振時の形態（振動モード）が異なる。木材では、試験片の振動しない位置（振動モードの節）でひも等を用いて支持する「両端自由たわみ振動法」が多く用いられている。この方法では試験片支持による損失が少なく  $\tan\delta$  が小さい材料に向いており、木材以外では金属材料にも用いられている。

一方、鋼板やアルミニウムなどの金属基材にゴムや高分子材料などを貼り付けた複合材料である制振複合はりの  $\tan\delta$  の測定には「中央加振法」が用いられている。この方法は、試験片の中央を治具を介して加振器と接合し、試験片の中央を支持した状態で加振と測定を行なう方法である。この支持方法では試験片の中央がモードの節となる反共振（双片持ちはり）と、最も振幅が大きいモードの腹となる共振（両端自由はり）の二つの振動モードが交互に現れる。木質系材料で中央加振法を用いた例は、複合木質床板を測定した報告はあるが、無垢の木材試験片を測定した例は見当たらない。したがって、中央加振法で木材を測定した場合に、他の測定方法とどの程度測定値に差異があるのかは明確ではない。

\*国立研究開発法人森林研究・整備機構 森林総合研究所 主任研究員

そこで本研究では、中央加振法の木材への適用と測定方法の特性に関する知見を得ることを目的とした。また、中央加振法の測定装置は高価かつ複雑なものが多い。そのため、中央加振法装置の試作を行い測定値の妥当性を検討した。その後、測定方法ごとの比較、振動モードの違いが木材の振動的性質の測定値に与える影響を比較した。

## 第2章

JIS 準拠の中央加振法測定装置は、試験片と加振器、測定センサーであるインピーダンスヘッド、質量による影響を補正するマスキャンセルアンプ、解析を行なう FFT アナライザー、および恒温槽で構成されている。これらを簡略化した装置を試作した。試作装置では試験片端部の変位を測定することによりインピーダンスヘッドを、また、試験片の質量の影響が小さい反共振モードで測定を行なうことによりマスキャンセルアンプを省略した。加振器には大きな加振力を与えられる磁歪振動装置を使用し、圧延して平滑にしたアルミ線を介して試験片を接着した。この試作装置での周波数応答曲線および振動モードを確認した。ソフトウェア上で試験片の物性値をもつモデルで有限要素法 (FEM) による周波数応答解析を行い、試作装置で測定した周波数応答曲線と比較した。その結果、試作装置の応答曲線の反共振周波数は FEM で得られたそれとほぼ一致した。次に各次数の反共振周波数で試験片を加振させ、振動中の試験片の任意の位置の複振幅を測定し振動モードを直接確認した。その結果、振動モードは中央支持はりの反共振各次数の振動モードと一致した。また、試験片に必要な寸法を決定するために長さ ( $l$ ) を切断しながら測定を行ない、 $l/h$  高さ ( $h$ ) 比の影響を検討した。測定は Euler-Bernoulli 式で  $E'$  を、半価幅法で  $\tan\delta$  を算出した。その結果  $l/h$  が 50 倍以下から  $E'$  が急激に低下し  $\tan\delta$  は増大した。本研究では不均一性を考慮し試験片の  $l/h$  は 50 倍程度とした。

## 第3章

試作した装置を JIS 準拠の測定装置（神奈川県産業技術センターに設置）と比較して測定装置の妥当性を検討した。また、併せて両端自由たわみ振動法および片持ちはり法とも比較した。試験片は寸法 240(L)×20(R)×4~8(T) mm のシトカスプルス (*Picea sitchensis*) 材を用いた。試験片の厚みは JIS を参考にしながら各試験で  $l/h$  を調整し、 $E'$  および  $\tan\delta$  を測定した。その結果、試作装置と JIS 準拠の装置とで得られた測定値に有意差は認められず、装置を簡略化しても適正な値で測定が可能であった。しかしながら、各試験で得られた  $E'$  および  $\tan\delta$  にはそれぞれ差異がみられた。木材の繊維方向では  $E'$  と  $\tan\delta$  との間に強い負の相関関係が認められる。全ての試験で得られた  $E'$  と  $\tan\delta$  との間には強い負の相関関係が認められた。一方で、一次回帰式の傾きには差がなく切片には差があると考えられた。そこで  $E'$  および  $\tan\delta$  について個別に考察した。各試験で得られた  $E'$  を一元配置分散分析と

Bonferroni 法による多重比較で検定した結果、両端自由たわみ振動法と中央加振法との間に有意差は認められなかった。片持ちはり法の  $E'$  は、両端自由たわみ振動法と中央加振法のそれと比べ有意に低い値を示した。片持ちはり法では試験片の一端をクランプなどで固定するが、固定部が測定値に影響を与えることが報告されており、締め付けトルクの不足や固定部内でのせん断歪みの影響により  $E'$  が低下することが知られている。しかし、同様に固定部のある中央加振法反共振では、固定部がモードの節にありたわみとたわみ角は拘束されず、クランプによる影響は少ない。そのため、中央加振法反共振は固定部の影響を受けずに片持ちはりの振動モードで測定できるといえる。

さらに、 $\tan\delta$  は  $E'$  の傾向とは異なった。中央加振法と片持ちはり法の  $\tan\delta$  は両端自由たわみ振動法と比べて有意に高い値を示した。また、片持ちはり法の  $\tan\delta$  はスパンによっては中央加振法のそれより有意に高かった。 $E'$  の結果から固定部の影響が少ないと考えられる中央加振法だが、 $\tan\delta$  が高かったのは振動モードの違いによると考えられる。材料によっては振動モードの違いによって  $\tan\delta$  の測定値が異なる場合があり、これはモード依存性と呼ばれている。木材のモード依存性については明らかではないが、木材におけるモード依存性の影響が示唆された。

## 第4章

モード依存性の影響を検討するために供試樹種および振動モードを増やして測定し比較した。試験片には針葉樹材からドイツトウヒ (*Picea abies*)、シトカスプルース (*Picea sitchensis*)、エンゲルマンズプルース (*Picea engelmannii*)、レッドシダー (*Thuja plicata*) を、比較として広葉樹材からミズナラ (*Quercus crispula*)、ブナ (*Fagus crenata*)、ウォルナット (*Juglans nigra*) を用いた。試験片寸法は、19(R)×4(T)mm であり、 $l$  が 200(L) mm となるように各試験方法で調整した。振動試験の支持方法は両端固定はり、片持ちはり、両端自由はり、中央支持はりの振動モードで測定を行なった。なお、中央支持はりとは中央加振法の試作装置で測定を行なった。その結果、両端固定および片持ちの  $E'$  は中央支持および両端自由のそれと比較して有意に低く、両端自由と中央支持との間に有意差は認められなかった。また、中央支持の  $E'$  を TGH 法を用いて回転慣性とせん断変形の影響を除外した  $E'$  と比較した結果、その差は小さかったため固定部の影響に加えて回転慣性とせん断変形の影響は小さいと考えられた。 $\tan\delta$  は複数樹種においても中央支持と両端自由との間に有意差が認められ、振動モードの違いを複数樹種で確認した。しかしながら、樹種によって中央支持と両端自由との  $\tan\delta$  の差の大きさは異なった。この差は密度および TGH 法で得られた  $G'$  との間に相関関係は認められず、樹種間のどのような因子が影響を与えているかは特定できなかった。

## 第5章

本研究では中央加振法の木材への適用を目的として実験を行なった。中央加振法の装置は高額でもあるためこれを簡略化した装置を試作し、測定値の妥当性を検討した結果、JIS 準拠の測定装置とほぼ同様の測定値が得られ装置の妥当性を確認した。中央加振法での測定値を検討した結果、 $E'$ は両端自由たわみ振動法とほぼ同様の値であった。この結果は固定部の影響を受けずに片持ちりの振動モードで、また質量の影響がなく強制振動で測定が行なえることを示した。一方、中央加振法の  $\tan\delta$  は両端自由たわみ振動法のそれと比較して高い値であり、固定部の影響が少ないと考えられることからモード依存性によるものと考えられた。また、モード依存性を複数の樹種で比較したところ樹種によって異なる可能性が示唆された。

### 審査報告概要

木材の物性値の測定や楽器用材の評価では一般に試験片をひもなどでつるして支持する「両端自由たわみ振動法」が用いられる。一方、木材以外の制振材料では試験片を中央で加振機と接続して測定を行う「中央加振法」が JIS で規定されている。しかし、この方法は木材への適用例が少なく、どのような特徴を示すのかが明らかではない。そこで、測定装置の一部を簡略化した試作機を作製し、JIS 規定の機器との比較を行い、試作機の妥当性を明らかにした。さらに、中央加振法での測定値を両端自由たわみ振動法のそれと比較したところ、得られた比動的ヤング率とほぼ一致したが、損失正接は高い値を示した。中央加振法は固定部の影響を除外しているので、振動のモード依存性を持つことが推測された。複数樹種で同様の傾向がみられ、それが樹種によって異なる可能性が示唆された。

これらの研究成果等を詳細に検討した結果、審査委員一同は博士（林学）の学位を授与する価値があると判断した。